

考虑输出约束的冗余驱动绳索并联机器人预设性能控制

陈正升^{1,2} 程玉虎^{1,2} 王雪松^{1,2}

摘要 提出一种考虑输出约束的冗余驱动绳索并联机器人 (Redundantly-actuated cable driving parallel robots, RCDPRs) 预设性能有限时间控制算法. 首先, 采用 Newton-Euler 方程推导系统动力学模型, 并建立绳索拉力优化模型保证系统正常工作; 其次, 将输出约束问题转化为位置跟踪误差的坐标变换问题, 设计给定时间衰减函数与非对称变换函数, 将约束形式的跟踪误差转化为无约束变量, 实现给定时间的输出约束; 然后, 针对滑模控制的抖振问题, 在预设性能控制中采用模型不确定与扰动估计器进行扰动估计, 并通过自适应方法对扰动估计误差进行补偿; 以此为基础, 提出一种基于精度驱动且在分段点处三阶连续的终端滑模面进行控制算法设计; 最后, 采用 Lyapunov 函数证明算法的有限时间收敛特性, 并以 7 自由度冗余驱动绳索并联机器人为控制对象进行仿真研究, 对算法进行验证.

关键词 滑模控制, 有限时间收敛, 输出约束, 给定时间预设性能控制, 冗余驱动绳索并联机器人

引用格式 陈正升, 程玉虎, 王雪松. 考虑输出约束的冗余驱动绳索并联机器人预设性能控制. 自动化学报, 2022, 48(7): 1704-1717

DOI 10.16383/j.aas.c210949

Prescribed Performance Control of Redundantly-actuated Cable Driving Parallel Robots Subjected to Output Constraint

CHEN Zheng-Sheng^{1,2} CHENG Yu-Hu^{1,2} WANG Xue-Song^{1,2}

Abstract This paper proposed a prescribed performance finite-time control algorithm of redundantly-actuated cable driving parallel robots (RCDPRs) considering output constraint. Firstly, the Newton-Euler equation is employed to establish the dynamic model of the system, and the optimization model for all cables was constructed to guarantee properly operation. Then, the output constraint problem is transformed into coordinate transformation problem of the position tracking errors, also the appointed time decay function and the asymmetric transformation function are designed to transform the tracking errors into unconstraint variables, thus the output constraint is realized. Meanwhile, aiming at the chattering problem, the uncertainty and disturbance estimator is proposed, and the adaptive algorithm is designed to compensate the estimation error, on the basis of which, the accuracy-driven terminal sliding mode surface with three-order continuity on the segment point is proposed and applied in controller design. Finally, the Lyapunov function is used to prove that the proposed algorithm has finite-time convergence characteristics, and a seven-degrees-of-freedom RCDPR is used as the control object for simulation research to demonstrate the effectiveness of the proposed controller.

Key words Sliding mode control, finite-time convergence, output constraint, appointed time prescribed performance control, redundantly-actuated cable driving parallel robots (RCDPRs)

Citation Chen Zheng-Sheng, Cheng Yu-Hu, Wang Xue-Song. Prescribed performance control of redundantly-actuated cable driving parallel robots subjected to output constraint. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(7): 1704-1717

收稿日期 2021-10-08 录用日期 2022-01-11
Manuscript received October 8, 2021; accepted January 11, 2022

国家自然科学基金 (61903347, 61976215, 62176259), 江苏省自然科学基金 (BK20200086) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61903347, 61976215, 62176259) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20200086)

本文责任编辑 程龙

Recommended by Associate Editor CHENG Long

1. 地下空间智能控制教育部工程研究中心 徐州 221116 2. 中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221116

1. Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, Ministry of Education, Xuzhou 221116 2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116

并联机器人具有高精度、高刚度及大负载自重比等优点, 已大量应用于高速搬运、运动模拟与电子制造等行业. 绳索驱动并联机器人是传统刚性并联机器人的延伸, 它采用绳索取代传统刚性并联机器人的刚性杆件, 具有工作空间大、杆件惯性低、可扩展性强等优点^[1].

然而, 由于绳索具有柔性仅能传递拉力, 因此必须保证绳索运行过程中始终处于拉伸状态, 目前通用的做法是增加冗余支链形成冗余驱动绳索并联机器人 (Redundantly-actuated cable driving parallel robots, RCDPRs), 通过控制冗余系统内力实

现各杆件拉伸进而保证机器人正常运行. 由于制造与安装误差的存在, 机器人杆件长度、驱动装置与负载安装位置、驱动系统与负载等参数都存在误差, 这将产生模型不确定性, 同时由于外部扰动的存在, 系统扰动项不可忽略. 开展冗余驱动绳索并联机器人高速高精度轨迹跟踪控制受到了广泛关注, 这也是目前的研究难点与热点. 动力学前馈控制^[2]、神经网络控制^[3]、鲁棒 H_∞ 控制^[4]、自适应控制^[5] 以及滑模控制^[6-7] 等已被应用于绳索驱动并联机器人的轨迹跟踪控制中.

由于滑模控制对参数不确定及外部扰动具有较强的鲁棒性及扰动抑制能力, 因此被广泛应用于线性与非线性系统控制中. 为提高传统线性滑模控制的收敛速度, 文献 [8-9] 在滑模面设计时采用非线性超平面代替传统滑模面中的线性超平面, 提出了终端滑模控制 (Terminal sliding mode control, TSMC) 与快速终端滑模控制 (Fast terminal sliding mode control, FTSMC), 此类控制方法不仅具有有限时间收敛特性, 同时降低了控制增益, 然而跟踪误差在零附近时 TSMC 与 FTSMC 的控制输入将会出现奇异问题; 文献 [10-13] 通过设计滑模面中分数次幂项提出了非奇异终端滑模控制 (Nonsingular terminal sliding mode control, NTSMC) 与非奇异快速终端滑模控制 (Nonsingular fast terminal sliding mode control, NFTSMC), 解决了 TSMC 与 FTSMC 中的奇异问题; 针对文献 [12-13] 中由于误差高阶项的非线性系数使得控制算法设计复杂的问题, 文献 [14] 提出在分段点具有两阶连续的 NFTSMC 算法. 然而, 采用上述算法取得的跟踪精度依赖于滑模面系数的选择, 较大的系数将会取得良好的跟踪精度, 但同时也需要更大的驱动力矩, 因此, 研究 NFTSMC 中滑模面系数的选择方法使其可以依据跟踪误差数值进行调整具有重要意义.

符号函数的使用及其增益的过估计产生的抖振现象是滑模控制面临的另外一个关键问题. 为了降低或消除抖振问题, 国内外学者提出了边界层滑模、高阶滑模、自适应滑模与基于观测器的滑模控制等. 自适应滑模控制采用模糊规则、神经网络、多项式对扰动项进行逼近, 或对符号函数的增益项进行自适应更新, 并在算法稳定性分析时确定自适应项更新率, 进而保证算法稳定性^[15-16]. 自适应方法可以获得较小的稳态跟踪误差, 但通常需要较大的增益才能取得理想效果, 同时需要较大驱动力矩. 基于观测器的滑模控制是解决抖振问题的另外一种有效方法, 该方法采用观测器对扰动项进行估计, 国内外研究学者分别采用了扰动观测器^[17-18]、扩张观测器^[19]、时延观测器^[20]、滑模观测器^[21] 对滑模控制的扰动项进行估计, 但扰动估计精度依赖于观测器参数的选

择. 模型不确定与扰动观测器 (Uncertainty and disturbance estimator, UDE) 采用滤波器对扰动项进行估计, 目前已应用于机械系统控制的扰动估计中^[22-24], 且与时延观测器相比, UDE 可以取得更好的扰动估计效果^[25]. 然而, UDE 等扰动观测器通常被视为低通滤波器, 无法对高频扰动进行有效估计, 这将产生稳态跟踪误差, 且观测精度对参数选取较敏感.

上述研究仅考虑了稳态误差, 没有考虑系统整个运行阶段的输出约束. 现有针对输出约束的研究主要采用障碍 Lyapunov 函数与预设性能函数进行实现, 由于基于障碍 Lyapunov 函数的方法存在描述输出性能的参数少及内在奇异性问题, 使得其应用受到一定限制^[26-27]; 基于预设性能的方法通过构建非线性函数将约束形式的跟踪误差转化为无约束形式变量, 同时可以通过设计指数衰减函数实现给定时间的输出约束^[28-29], 该方法已被广泛应用于机器人控制中. 然而现有基于预设性能的输出约束控制主要采用指数衰减函数, 无法获得达到预定性能的具体时间, 同时由于机器人中电机与减速机输出能力不对称等原因, 研究非对称给定时间输出约束具有重要意义. 为实现冗余驱动绳索并联机器人的高精度控制并解决上述方法存在的问题, 本文将开展以下研究: 1) 设计给定时间衰减函数与非线性变换函数, 并将考虑预设性能的跟踪误差转换为无约束变量, 实现非对称给定时间输出约束; 2) 提出基于精度驱动且在分段点处三阶连续的非奇异快速终端滑模面进行控制算法设计, 实现有限时间控制; 3) 结合扰动观测器与自适应控制优点, 在预设性能控制中采用 UDE 进行扰动估计, 并通过自适应方法对扰动估计误差进行补偿, 同时开展仿真研究, 验证本文算法的有效性.

1 动力学建模与问题描述

1.1 冗余驱动绳索并联机器人动力学建模

动力学模型是开展控制算法研究的基础, 本节以图 1 所示具有 m 个自由度的冗余驱动绳索并联机器人为对象分别开展运动学与动力学建模, 该机器人由基座、动平台和 n 条通过绳索连接的分支组成. 坐标系 $\{O\}$ 和 $\{P\}$ 以 O 和 P 为原点, 分别固连到基座与动平台上, 其中 $i = 1, \dots, n$; 绳索与动平台及基座的连接点为 A_i 和 B_i , 其在动平台与基座坐标系下的位置矢量分别表示为 \mathbf{a}_i 和 \mathbf{b}_i ; \mathbf{p} 和 \mathbf{l}_i 表示在基座坐标系下动平台和绳索的位置矢量; 动平台中心点 P 的位姿即系统输出 $\boldsymbol{\eta} = [\mathbf{p}^T \ \boldsymbol{\sigma}^T]^T$, 由位置矢量 $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$ 及姿态角度 $\boldsymbol{\sigma} = [\phi \ \theta \ \varphi]^T$ 组成, 其中欧拉角 ϕ 、 θ 与 φ 分别为关于 Z 轴、 Y 轴和 X 轴的转动角度, 相应的旋转矩阵为^[30]:

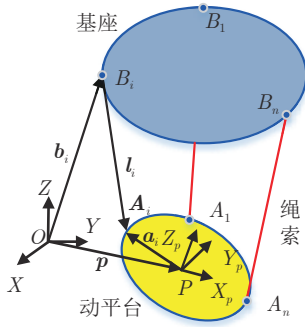


图 1 冗余驱动绳索并联机器人结构原理图

Fig.1 Structural schematic diagram of the RCDPR

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{R}_z(\phi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\varphi) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{R}_x(\varphi)$ 、 $\mathbf{R}_y(\theta)$ 与 $\mathbf{R}_z(\phi)$ 分别表示沿 X 轴、 Y 轴与 Z 轴的旋转变换矩阵.

根据图 1, 绳索 i 的运动方程及长度可表示为^[31]:

$$\begin{cases} l_i = l_i \mathbf{d}_i = \mathbf{p} - \mathbf{b}_i + \mathbf{R}_p \mathbf{a}_i \\ l_i = \|l_i\| = \sqrt{(\mathbf{p} - \mathbf{b}_i + \mathbf{R}_p \mathbf{a}_i)^\top (\mathbf{p} - \mathbf{b}_i + \mathbf{R}_p \mathbf{a}_i)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, l_i 为第 i 根绳索长度, $\mathbf{d}_i = l_i/l_i$ 为描述绳索方向的单位向量, \mathbf{a}_i 与 \mathbf{b}_i 为常向量. 随着动平台位姿变量 $\boldsymbol{\eta}$ 的改变, 动平台位置 \mathbf{p} 与描述姿态变化的旋转矩阵 \mathbf{R}_p 将发生改变, 进而使得绳索 i 的长度 l_i 随之改变.

将式 (2) 第一部分对时间求一阶导数, 并对方程两边点乘 \mathbf{d}_i 可得:

$$\dot{l}_i = \mathbf{d}_i^\top \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{d}_i^\top (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_p \mathbf{a}_i) \quad (3)$$

其中, \dot{l}_i 为绳索 i 的长度变化率, $\dot{\mathbf{p}}$ 与 $\boldsymbol{\omega}$ 分别为动平台平移速度与角速度, \mathbf{d}_i^\top 为单位向量 \mathbf{d}_i 的转置. 根据混合积的运算关系有 $\mathbf{d}_i^\top (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_p \mathbf{a}_i) = (\mathbf{R}_p \mathbf{a}_i \times \mathbf{d}_i)^\top \boldsymbol{\omega}$, 为便于对各绳索运动进行统一描述, 根据式 (3), 建立各绳索与动平台的运动关系为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{l}} = [\dot{l}_1; \dots; \dot{l}_n] = \mathbf{J} [\dot{\mathbf{p}}; \boldsymbol{\omega}] = \mathbf{J} \mathbf{S}' [\dot{\mathbf{p}}; \dot{\boldsymbol{\omega}}] = \mathbf{J} \mathbf{S}' \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 & \dots & \mathbf{d}_n \\ \mathbf{R}_p \mathbf{a}_1 \times \mathbf{d}_1 & \dots & \mathbf{R}_p \mathbf{a}_n \times \mathbf{d}_n \end{bmatrix}^\top \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\dot{\mathbf{l}}$ 表示由各绳索长度变化率组成的速度向量, $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 为 $\boldsymbol{\omega}$ 的导数, \mathbf{J} 为描述动平台与绳索速度映射的雅可比矩阵, $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{S} \dot{\boldsymbol{\omega}}$ 为基座坐标系下动平台角速度. 映射矩阵 \mathbf{S}' 及单位矩阵 \mathbf{S} 可表示为^[30]:

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{S} \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \\ 0 & \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ 1 & 0 & -\sin \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, \mathbf{I}_3 与 $\mathbf{0}_3$ 分别为 3×3 的单位对角阵与零矩阵. 以上述运动学模型为基础, 根据 Newton-Euler 方程, 动平台的动力学方程可表示为^[30]:

$$\begin{bmatrix} m_p \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}'_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{p}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}'_p \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^\top \mathbf{F} + m_p \begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{0}_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, m_p 为动平台质量, $\mathbf{I}'_p = \mathbf{R}_p^\top \mathbf{I}_p \mathbf{R}_p$ 为动平台关于基座坐标系的惯量矩阵, \mathbf{I}_p 为动平台关于固连坐标系的惯量矩阵, \mathbf{J}^\top 为矩阵 \mathbf{J} 的转置, \mathbf{F} 为绳索拉力, $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ 为 3×1 的零矩阵. 将式 (4) 中运动关系 $[\dot{\mathbf{p}}; \dot{\boldsymbol{\omega}}] = \mathbf{S}' [\dot{\mathbf{p}}; \dot{\boldsymbol{\omega}}]$ 代入式 (6), 同时为保证惯性矩阵对称性, 将式 (6) 两边同时乘以 \mathbf{S}' 可得:

$$\begin{bmatrix} m_p \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{S}'^\top \mathbf{R}_p^\top \mathbf{I}_p \mathbf{R}_p \mathbf{S} \end{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{S}'^\top (\mathbf{S} \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{R}_p^\top \mathbf{I}_p \mathbf{R}_p \mathbf{S} + \mathbf{R}_p^\top \mathbf{I}_p \mathbf{R}_p \dot{\mathbf{S}}) \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} = -\mathbf{S}'^\top \mathbf{J}^\top \mathbf{F} + m_p \begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{0}_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据牛顿运动定律, 电机运动方程为:

$$I_b \ddot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} + r \mathbf{F} \quad (8)$$

其中, I_b 与 r 为电机-滑轮组件的转动惯量及滑轮半径, $\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{l}}/r$ 为电机运转的角加速度. 将式 (4) 中第一个方程对时间求导, 将其代入式 (8) 可得:

$$\frac{I_b (\mathbf{J} \mathbf{S}' \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{J} \dot{\mathbf{S}}' \dot{\boldsymbol{\eta}} + \dot{\mathbf{J}} \mathbf{S}' \dot{\boldsymbol{\eta}})}{r} = \boldsymbol{\tau} + r \mathbf{F} \quad (9)$$

将式 (9) 两边同时乘以 $\mathbf{S}'^\top \mathbf{J}^\top / r$, 并与式 (7) 相加, 可得到绳索驱动并联机器人一般形式的动力学方程为:

$$\mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{f} + \mathbf{d} = \mathbf{B} \boldsymbol{\tau} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{M}_1 = [m_p \mathbf{I}_3 \quad \mathbf{0}_3; \mathbf{0}_3 \quad \mathbf{S}'^\top \mathbf{R}_p^\top \mathbf{I}_p \mathbf{R}_p \mathbf{S}]$, $\mathbf{M}_2 = I_b \mathbf{S}'^\top \mathbf{J}^\top \mathbf{J} \mathbf{S}' / r^2$, $\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2$, $\mathbf{f}_1 = [-\mathbf{G}_p; \mathbf{S}'^\top (\mathbf{S} \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{R}_p^\top \mathbf{I}_p \mathbf{R}_p \mathbf{S} + \mathbf{R}_p^\top \mathbf{I}_p \mathbf{R}_p \dot{\mathbf{S}}) \dot{\boldsymbol{\eta}}]$, $\mathbf{f}_2 = I_b \mathbf{S}'^\top \mathbf{J}^\top (\mathbf{J} \dot{\mathbf{S}}' \dot{\boldsymbol{\eta}} + \dot{\mathbf{J}} \mathbf{S}' \dot{\boldsymbol{\eta}}) / r^2$, $\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$, $\mathbf{B} = \mathbf{S}' \mathbf{J}^\top / r$ 为电机参数传输矩阵, $\mathbf{d} = \Delta \mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \Delta \mathbf{f} + \mathbf{d}_e$ 为扰动项, \mathbf{d}_e 为外部扰动, $\Delta \mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \Delta \mathbf{f}$ 为模型不确定项, $\Delta \mathbf{M}$ 与 $\Delta \mathbf{f}$ 分别为 \mathbf{M} 与 \mathbf{f} 的不确定部分.

设置绳索组成的支链数 n 大于机器人自由度 m , 因此可以在保证机器人正常运行的情况下控制绳索内力保证其拉伸状态. 根据式 (7), 绳索拉力可表示为:

$$\mathbf{F} = -\mathbf{W}^+(\mathbf{M}_1\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{f}_1) - \mathbf{N}\boldsymbol{\lambda} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{W}^+ = \mathbf{W}^T(\mathbf{W}\mathbf{W}^T)^{-1}$ 为矩阵 $\mathbf{W} = \mathbf{S}^T\mathbf{J}^T$ 的 Moore-Penrose 伪逆矩阵, \mathbf{N} 为矩阵 \mathbf{W} 的零空间矩阵; $\boldsymbol{\lambda}$ 为 $(n-m)$ 维的任意向量. 方程 (11) 为绳索拉力的所有可能解, 而对于给定位姿, 驱动力矩 $\boldsymbol{\tau}$ 应该是确定的而且满足节能要求. 因此, 本文将绳索拉力的 2 范数作为优化目标, 其 2 范数可表示为:

$$\|\mathbf{F}\|_2 = \|\mathbf{W}^+\mathbf{F}_{\text{nom}} + \mathbf{N}\boldsymbol{\lambda}\|_2 = \|\mathbf{F}_{\text{nom}}\|_2 + \|\boldsymbol{\lambda}\|_2 \quad (12)$$

其中, $\mathbf{F}_{\text{nom}} = \mathbf{M}_1\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{f}_1$. 由于优化变量 $\boldsymbol{\lambda}$ 仅出现在 $\boldsymbol{\lambda}^T\boldsymbol{\lambda}$ 中, 因此为保证绳索处于拉伸状态及节能要求, 可构建如下优化问题:

$$\begin{cases} \text{优化目标:} & \min \boldsymbol{\lambda}^T\boldsymbol{\lambda} \\ \text{约束条件:} & -\mathbf{W}^+(\mathbf{M}_1\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{f}_1) - \mathbf{N}\boldsymbol{\lambda} - \mathbf{F}_\delta \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, \mathbf{F}_δ 为设定的最小正拉力, 上式可采用二次规划方法进行求解.

假设 1. 假设扰动项 \mathbf{d} 有界且一阶可导, 其导数 $\dot{\mathbf{d}} = [\dot{d}_1, \dots, \dot{d}_n]^T$ 有界, 并满足 $|\dot{d}_i| \leq \dot{d}_i^*$ 及 $\dot{\mathbf{d}}^* = [\dot{d}_1^*, \dots, \dot{d}_n^*]^T$.

1.2 问题描述

对于冗余驱动绳索并联机器人, 假设其末端位置 $\boldsymbol{\eta}$ 与速度 $\dot{\boldsymbol{\eta}}$ 是可测的, 本文开展的控制问题可描述为: 对于动力学模型 (10) 与绳索拉力优化模型 (13), $\boldsymbol{\eta}$ 与 $\boldsymbol{\eta}_d$ 分别为系统输出及其期望跟踪轨迹, 考虑系统扰动 \mathbf{d} 设计驱动力矩 $\boldsymbol{\tau}$, 使得 $\boldsymbol{\eta}$ 的跟踪误差始终在预定的约束范围内, 并保证所有的绳索拉力不小于 \mathbf{F}_δ 及驱动力矩最小.

2 控制算法设计与稳定性分析

引理 1^[32]. 对于任意给定的正数 η , 以下不等式成立:

$$0 \leq |\eta| - \eta \tanh\left(\frac{\eta}{\gamma}\right) \leq 0.2785\gamma \quad (14)$$

其中, $\tanh(\cdot)$ 为双曲正切函数, γ 为正常数.

引理 2^[33]. 对于连续正定函数 $V(t)$, 当 $t > 0$ 时不等式 $\dot{V}(t) \leq -a_0V^\alpha(t) + b_0$ 成立, 其中 a_0 、 b_0 与 α 均为正值, 并满足 $0 < \alpha < 1$, 则存在 $0 < \theta_0 < 1$, 使得 $V(t)$ 在有限时间 T_r 收敛到 V_0 , 且 V_0 与 T_r 的上界分别为:

$$\begin{aligned} V_0 &= \lim_{t \rightarrow T_r} V(t) \leq \left(\frac{b_0}{(1-\theta_0)a_0}\right)^{\frac{1}{\alpha}}, \\ T_r &\leq \frac{V^{1-\alpha}(0)}{(1-\alpha)\theta_0 a_0} \end{aligned} \quad (15)$$

2.1 UDE 方法

UDE 方法根据系统模型、控制律及滤波器得到扰动表达式^[34-35], 可表示为:

$$\hat{\mathbf{d}} = \mathbf{d} * L^{-1}(G_f) \quad (16)$$

其中, $L^{-1}(\cdot)$ 为 Laplace 逆变换, $*$ 表示卷积运算, G_f 表示滤波器 g_f 的频域表达式. 文中 G_f 为一阶滤波器, 可表示为:

$$G_f = \frac{1}{Ts+1} \quad (17)$$

其中, s 为 Laplace 算子, T 为时间常数, 将式 (16) 代入式 (17) 可得:

$$T\dot{\hat{\mathbf{d}}} + \hat{\mathbf{d}} = \mathbf{d} \quad (18)$$

定义 $\tilde{\mathbf{d}} = \mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}} = [\tilde{d}_1, \dots, \tilde{d}_n]^T$ 为扰动估计误差, 由式 (18) 可得到扰动估计误差为:

$$\dot{\tilde{\mathbf{d}}} + \frac{\tilde{\mathbf{d}}}{T} = \dot{\mathbf{d}} \quad (19)$$

根据式 (19) 可得:

$$\tilde{\mathbf{d}} = e^{\mathbf{A}t}\tilde{\mathbf{d}}(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)}\mathbf{b}\dot{\mathbf{d}}\tau \quad (20)$$

其中, \mathbf{e} 为自然常数, $\mathbf{A} = -\mathbf{I}_m/T$, $\mathbf{b} = \mathbf{I}_m$.

由于时间常数 T 是正值, \mathbf{A} 为 Hurwitz 矩阵. 根据假设 1 与式 (20), 存在正向量 $\tilde{\mathbf{d}}^{\max} = [\tilde{d}_1^{\max}, \dots, \tilde{d}_n^{\max}]^T$, 使得 $|\tilde{d}_i| \leq \tilde{d}_i^{\max}$ 成立, 因此扰动估计误差是有界的.

注 1. 对于冗余驱动绳索并联机器人系统, 模型不确定项 $\Delta\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \Delta\mathbf{f}$ 满足假设 1. 外部扰动项 \mathbf{d}_e 为机器人与环境之间的交互力, 由于机电系统本身具有一定柔性, \mathbf{d}_e 的导数可能在极短时间内不存在, 其仅对瞬态的跟踪误差产生影响, 不改变系统收敛特性.

2.2 针对输出约束的非线性变换

根据动力学模型, 定义跟踪误差为:

$$\mathbf{e} = [e_1, \dots, e_m]^T = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_d \quad (21)$$

其中, $\boldsymbol{\eta}_d$ 为期望的位置. 为实现输出约束, 对跟踪误差定义如下非对称约束:

$$-\varepsilon_{1i}\mu_i(t) < e_i < \varepsilon_{2i}\mu_i(t) \quad (22)$$

其中, $\varepsilon_{1i} > 0$ 与 $\varepsilon_{2i} > 0$ 为常数, 记 $\boldsymbol{\varepsilon}_1 = [\varepsilon_{11}, \dots, \varepsilon_{1m}]^T$ 与 $\boldsymbol{\varepsilon}_2 = [\varepsilon_{21}, \dots, \varepsilon_{2m}]^T$, 且 $\varepsilon_{1i} \leq \varepsilon_{2i}$, $\mu_i(t)$ 为给定时间衰减函数. 与现有预设性能控制中指数衰减函数不同, 为实现给定时间输出约束, 定义如下给定时间衰减函数:

$$\mu_i(t) = \begin{cases} (\mu_{i0} - \mu_{i\infty}) e^{-kt \tan(\frac{\pi t}{2T_e})} + \mu_{i\infty}, & t < T_e \\ \mu_{i\infty}, & t \geq T_e \end{cases} \quad (23)$$

其中, $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \dots, \mu_m]^T$, e^{-kt} 为指数项, $\mu_{i0} > 0$ 为 $\mu_i(t)$ 的初始值, 终止值满足 $\mu_{i\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \mu_i(t) > 0$, 分别记为 $\boldsymbol{\mu}_0 = [\mu_{10}, \dots, \mu_{m0}]^T$ 与 $\boldsymbol{\mu}_\infty = [\mu_{1\infty}, \dots, \mu_{m\infty}]^T$, 收敛率 k 为常数, T_e 为给定时间常数.

式 (22) 为约束形式的跟踪误差 \mathbf{e} , 为便于算法设计, 本文采用饱和函数将其转化为无约束形式变量 $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_m]^T$, 可表示为:

$$e_i = \mu_i(t) \varsigma_i(z_i) \quad (24)$$

其中, $\varsigma_i(z_i)$ 为非线性变换函数, 可表示为^[36]:

$$\varsigma_i(z_i) = \frac{\varepsilon_{2i} e^{z_i+v_i} - \varepsilon_{1i} e^{-z_i-v_i}}{e^{z_i+v_i} + e^{-z_i-v_i}} \quad (25)$$

其中, $v_i = \ln(\mu_{2i}/\mu_{1i})/2$. $\varsigma_i(z_i)$ 为递增函数, 具有以下性质:

- 1) $\varsigma_i(0) = 0$; 2) $\lim_{z_i \rightarrow +\infty} \varsigma_i(z_i) = \beta_i$;
- 3) $\lim_{z_i \rightarrow -\infty} \varsigma_i(z_i) = -\alpha_i$

转换后的跟踪误差 z_i 可表示为:

$$z_i = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\mu_i(t) \varepsilon_{1i} + e_i}{\mu_i(t) \varepsilon_{2i} - e_i} \cdot \frac{\varepsilon_{2i}}{\varepsilon_{1i}} \right) \quad (26)$$

根据式 (26), 跟踪误差 z_i 的速度与加速度为:

$$\begin{cases} \dot{z} = \chi (\Lambda \dot{e} - \dot{\Lambda} e) \\ \ddot{z} = \dot{\chi} (\Lambda \dot{e} - \dot{\Lambda} e) + \chi \Lambda M^{-1} (B \tau - M \ddot{y}_d - \mathbf{f} - \mathbf{d}) - \chi \dot{\Lambda} e \end{cases} \quad (27)$$

$\text{diag}\{\cdot\}$ 表示对角线元素为实向量的对角阵, $\chi = \text{diag}\{\sigma_1, \dots, \sigma_m\}$ 与 $\Lambda = \text{diag}\{\mu_1, \dots, \mu_m\}$ 均为对角阵, 且 $\sigma_i = (\varepsilon_{2i} + \varepsilon_{1i}) / (2(\varepsilon_{2i} \mu_i(t) - e_i)(\varepsilon_{1i} \mu_i(t) + e_i))$.

2.3 精度驱动滑模面设计

为保证跟踪误差有限时间收敛, 本文提出精度驱动的非奇异快速终端滑模面:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{z}} + \text{diag}\{\boldsymbol{\rho}_1(\mathbf{z})\} (\mathbf{K}_1 \mathbf{z} + \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{z})) \quad (28)$$

其中, $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_m]^T$, $\mathbf{K}_1 = \text{diag}\{[k_{11}, \dots, k_{1m}]\}$ 与 $\mathbf{K}_2 = \text{diag}\{[k_{21}, \dots, k_{2m}]\}$ 为正常数对角矩阵, $\boldsymbol{\rho}_1$ 与 $\boldsymbol{\rho}_2$ 分别为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\rho}_1(\mathbf{z}) = 1 + \beta_4 \tanh(\beta_5 |\mathbf{z}|) \\ \boldsymbol{\rho}_{2i}(z_i) = \begin{cases} \text{sig}^{\alpha_1}(z_i), & \bar{s}_i = 0 \vee (\bar{s}_i \neq 0 \wedge z_i > \Delta_{1i}) \\ \beta_{1i} z_i + \beta_{2i} \text{sgn}^{\alpha_2}(z_i) + \beta_{3i} \text{sgn}^{\alpha_3}(z_i), & \bar{s}_i \neq 0 \wedge z_i \leq \Delta_{1i} \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

其中, $\bar{s}_i = \dot{z}_i + (1 + \beta_4 \tanh(\beta_5 |z_i|))(k_{1i} z_i + k_{2i} \text{sig}^{\alpha_1}(z_i))$,

α_1, α_2 与 α_3 满足 $0 < \alpha_1 < 1 < \alpha_2 < \alpha_3 < 2$, Δ_{1i} 为设定的跟踪误差值, β_4 与 β_5 为用户给定的正常数. β_{1i} 至 β_{3i} 可根据滑模面及其一阶与二阶导数的连续性计算得到, 可表示为:

$$\begin{aligned} \beta_{3i} &= \frac{(\alpha_1 - 1)(\alpha_2 - \alpha_1 - 1)}{\alpha_3(\alpha_2 - \alpha_3) \Delta_{1i}^{\alpha_3 - \alpha_1}} \\ \beta_{2i} &= \frac{(\alpha_1 - 1)(\alpha_3 - \alpha_1 - 1)}{\alpha_2(\alpha_3 - \alpha_2) \Delta_{1i}^{\alpha_2 - \alpha_1}} \\ \beta_{1i} &= \Delta_{1i}^{\alpha_1 - 1} - \beta_{2i} \Delta_{1i}^{\alpha_2 - 1} - \beta_{3i} \Delta_{1i}^{\alpha_3 - 1} \end{aligned}$$

注 2. 式 (29) 中 $\boldsymbol{\rho}_1(\mathbf{z})$ 为精度驱动的时变向量函数, 用于提高滑模阶段跟踪误差 \mathbf{z} 的收敛速度, 同时可以根据 $|\mathbf{z}|$ 的数值调整自身大小, 进而避免了跟踪误差收敛到稳定状态时过大的输入力矩; $\boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{z})$ 用于避免滑模面出现奇异, 并保证其有限时间收敛特性.

引理 3. 根据式 (28) 所示滑模面, 构造如下系统:

$$\dot{\mathbf{z}} = -\text{diag}\{\boldsymbol{\rho}_1(\mathbf{z})\} (\mathbf{K}_1 \mathbf{z} + \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{z})) + \boldsymbol{\delta}_0 \quad (30)$$

其中, $\boldsymbol{\delta}_0$ 为有界时变扰动. 则 \mathbf{z} 是有限时间收敛的, 其收敛域为:

$$\Omega_{1i} = \left\{ z_i \mid |z_i| \leq \max \left\{ \frac{|\delta_{0i}|}{k_{1i} + \beta_{1i} k_{2i}}, \Delta_{1i} \right\} \right\}$$

证明. 考虑 Lyapunov 函数 $V_1 = \mathbf{z}^T \mathbf{z} / 2$, 对 V_1 求一阶导数可得:

$$\dot{V}_1 = 2\mathbf{z}^T \dot{\mathbf{z}} = -2\mathbf{z}^T (\text{diag}\{\boldsymbol{\rho}_1(\mathbf{z})\} (\mathbf{K}_1 \mathbf{z} + \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{z})) + \boldsymbol{\delta}_0) \quad (31)$$

由式 (29), 当 $\rho_{2i}(z_i) = \text{sig}^{\alpha_1}(z_i)$ 时, \dot{V}_1 可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = 2\mathbf{z}^T \dot{\mathbf{z}} = & -2\mathbf{z}^T (\text{diag}\{\boldsymbol{\rho}_1(\mathbf{z})\} (\mathbf{K}_1 \mathbf{z} + \mathbf{K}_2 \text{sig}^{\alpha_1}(\mathbf{z}) + \boldsymbol{\delta}_0)) = \\ & -2 \sum_{i=1}^n k_{1i} \rho_{1i} z_i^2 - 2 \sum_{i=1}^n k_{2i} \rho_{1i} z_i^{1+\alpha_1} - \\ & 2 \sum_{i=1}^n \rho_{1i} z_i \delta_{0i} \leq -2 \sum_{i=1}^n k_{1i} \rho_{1i} z_i^2 - \\ & 2 \sum_{i=1}^n k_{2i} \rho_{1i} z_i^{1+\alpha_1} + 2 \sum_{i=1}^n \rho_{1i} |z_i| |\delta_{0i}| \end{aligned} \quad (32)$$

根据引理 1, 当 $|z_i| \geq |\delta_{0i}|/k_{1i}$ 时, 式 (32) 满足 $\dot{V}_1 \leq -2 \sum_{i=1}^n \rho_{1i} k_{2i} z_i^{1+\alpha_1}$, 位置误差 z_i 是有限时间收敛的, 其收敛上界为 $\Omega_{1i} = \{z_i \mid |z_i| \leq \max\{|z_i| \geq |\delta_{0i}|/k_{1i}, \Delta_{1i}\}\}$, 收敛时间 T_{r1} 可表示为:

$$T_{r1} < \frac{2V_1^{\frac{1+\alpha_1}{2}}(0)}{\min\{k_{2i}\} \theta_1 (1 + \beta_4) (1 + \alpha_1)} \quad (33)$$

其中, $0 < \theta_1 < 1$. 当 $\rho_{2i}(z_i) = \beta_{1i} z_i + \beta_{2i} \text{sgn}^{\alpha_2}(z_i) +$

$\beta_{3i} \operatorname{sgn}^{\alpha_3}(z_i)$ 时, \dot{V}_1 可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = 2z^T \dot{z} = & -2z^T \operatorname{diag}\{\rho_1(z)\} (\mathbf{K}_1 z + \\ & \mathbf{K}_2(\beta_{1i} z + \beta_{2i} \operatorname{sig}^{\alpha_2}(z) + \beta_{3i} \operatorname{sig}^{\alpha_3}(z)) + \delta_0) = \\ & -2z^T \operatorname{diag}\{\rho_1(z)\} ((\mathbf{K}_1 + \beta_{1i} \mathbf{K}_2) z + \\ & \beta_{2i} \mathbf{K}_2 \operatorname{sig}^{\alpha_2}(z) + \beta_{3i} \mathbf{K}_2 \operatorname{sig}^{\alpha_3}(z) + \delta_0) = \\ & -2 \sum_{i=1}^n (k_{1i} + \beta_{1i} k_{2i}) \rho_{1i} z_i^2 - (2 \sum_{i=1}^n (\beta_{2i} k_{2i} \cdot \\ & \rho_{1i} |z_i|^{1+\alpha_2} + \beta_{3i} k_{2i} \rho_{1i} |z_i|^{1+\alpha_3}) - 2 \sum_{i=1}^n \rho_{1i} z_i \delta_{0i} \leq \\ & -2 \sum_{i=1}^n (k_{1i} + \beta_{1i} k_{2i}) \rho_{1i} z_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \rho_{1i} |z_i| \cdot |\delta_{0i}| = \\ & -2 \sum_{i=1}^n \rho_{1i} |z_i| ((k_{1i} + \beta_{1i} k_{2i}) |z_i| - |\delta_{0i}|) \quad (34) \end{aligned}$$

根据式 (34), 当 $|z_i| > |\delta_{0i}| / (k_{1i} + \beta_{1i} k_{2i})$ 时, 可得 $\dot{V}_1 < 0$, 位置跟踪误差 z_i 有限时间收敛. 综上所述, 位置跟踪误差 z_i 的收敛区域为:

$$\Omega_{1i} = \left\{ z_i \mid |z_i| \leq \max \left\{ \frac{|\delta_{0i}|}{k_{1i} + \beta_{1i} k_{2i}}, \Delta_{1i} \right\} \right\} \quad (35)$$

□

2.4 基于 UDE 的自适应滑模控制算法设计

根据式 (28), 滑模面的导数可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{s} = \dot{z} + \operatorname{diag}\{\dot{\rho}_1(z)\} (\mathbf{K}_1 z + \mathbf{K}_2 \rho_2(z)) + \\ \operatorname{diag}\{\rho_1(z)\} (\mathbf{K}_1 \dot{z} + \mathbf{K}_2 \dot{\rho}_2(z)) = \\ \dot{\chi} (\Lambda \dot{e} - \dot{\Lambda} e) + \chi \Lambda M^{-1} (\mathbf{B} \tau - M \dot{\eta}_d - d) - \\ \chi \ddot{\Lambda} e + \operatorname{diag}\{\dot{\rho}_1(z)\} (\mathbf{K}_1 z + \mathbf{K}_2 \rho_2(z)) + \\ \operatorname{diag}\{\rho_1(z)\} (\mathbf{K}_1 \dot{z} + \mathbf{K}_2 \dot{\rho}_2(z)) \quad (36) \end{aligned}$$

根据上式可定义控制律为:

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_{es} + \tau_{di} \quad (37)$$

其中, τ_{eq} 为根据理想模型计算的控制律, τ_{es} 为扰动估计项, τ_{di} 为鲁棒控制项. 根据机器人模型 (10)、跟踪误差 z_i 的速度 (27)、滑模面 (28) 及其导数 (36), τ_{eq} 可表示为:

$$\begin{aligned} \tau_{eq} = \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \left(M \dot{\eta}_d + \mathbf{f} - M (\chi \Lambda)^{-1} (\dot{\chi} (\Lambda \dot{e} - \dot{\Lambda} e) - \chi \ddot{\Lambda} e + \operatorname{diag}\{\dot{\rho}_1(z)\} (\mathbf{K}_1 z + \mathbf{K}_2 \rho_2(z)) + \operatorname{diag}\{\rho_1(z)\} (\mathbf{K}_1 \dot{z} + \mathbf{K}_2 \dot{\rho}_2(z))) \right) \quad (38) \end{aligned}$$

扰动估计项可表示为:

$$\tau_{es} = \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \hat{d} \quad (39)$$

鲁棒控制项可表示为:

$$\tau_{di} = \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{M} \left(-\mathbf{K}_3 s - \mathbf{K}_4 \tanh \left(\frac{s}{\varepsilon} \right) \right) \quad (40)$$

其中, $\mathbf{K}_3 = \operatorname{diag}\{k_{31}, \dots, k_{3m}\}$ 与 $\mathbf{K}_4 = \operatorname{diag}\{k_{41}, \dots, k_{4m}\}$ 均为正常数对角阵, 且对角线上元素均为正. 将式 (37) ~ 式 (40) 代入式 (36) 可得:

$$\dot{s} = -\chi \Lambda \left(\mathbf{K}_3 s + \mathbf{K}_4 \tanh \left(\frac{s}{\varepsilon} \right) + \mathbf{M}^{-1} \tilde{d} \right) \quad (41)$$

注 3. 定义 $\zeta = [\zeta_1, \dots, \zeta_m]^T = |\mathbf{M}^{-1} \tilde{d}|$, 根据假设 1 及式 (20), 扰动观测误差 \tilde{d} 及其导数 $\dot{\tilde{d}}$ 均有界, 对于有界输入轨迹 η_d 及其导数 $\dot{\eta}_d$, 对称矩阵 \mathbf{M} 有界. 因此, 存在有界正向量 $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_m]^T$, 使得 $\zeta_i \leq \xi_i$ 成立.

为对扰动观测误差进行补偿, 选择 $\mathbf{K}_4 \tanh(s/\varepsilon)$ 为针对扰动估计误差的鲁棒控制项, 并采用自适应方法对该项系数 $\mathbf{K}_4 = \operatorname{diag}\{\hat{k}_4 + \gamma_0\}$ 进行估计, γ_0 为正常数. 自适应项更新率为:

$$\dot{\hat{k}}_4 = -\lambda_1 \hat{k}_4 + \lambda_2 \chi \Lambda |s| \quad (42)$$

其中, λ_1 与 λ_2 为正常数. 根据式 (16) 与式 (10), 扰动估计值 \hat{d} 可表示为:

$$\hat{d} = (\mathbf{B} \tau - M \dot{\eta} - \mathbf{f}) * g_f \quad (43)$$

将式 (37) 代入式 (43), 并结合式 (38) ~ 式 (40) 可得到扰动估计值 \hat{d} 为:

$$\begin{aligned} \hat{d} = (-M \ddot{e} - M (\chi \Lambda)^{-1} (\dot{\chi} (\Lambda \dot{e} - \dot{\Lambda} e) - \chi \ddot{\Lambda} e + \\ \operatorname{diag}\{\dot{\rho}_1(z)\} (\mathbf{K}_1 z + \mathbf{K}_2 \rho_2(z)) + \operatorname{diag}\{\rho_1(z)\} \cdot \\ (\mathbf{K}_1 \dot{z} + \mathbf{K}_2 \dot{\rho}_2(z))) - \mathbf{K}_3 M s - \\ \mathbf{K}_4 M \tanh \left(\frac{s}{\varepsilon} \right) * L^{-1} \left(\frac{G_f}{1 - G_f} \right) = \\ - \frac{M \ddot{e}}{T} - \left(M (\chi \Lambda)^{-1} (\dot{\chi} (\Lambda \dot{e} - \dot{\Lambda} e) + \chi \ddot{\Lambda} e - \right. \\ \left. \operatorname{diag}\{\dot{\rho}_1(z)\} (\mathbf{K}_1 z + \mathbf{K}_2 \rho_2(z)) - \operatorname{diag}\{\rho_1(z)\} \cdot \right. \\ \left. (\mathbf{K}_1 \dot{z} + \mathbf{K}_2 \dot{\rho}_2(z))) + \mathbf{K}_3 M s + \right. \\ \left. \mathbf{K}_4 M \tanh \left(\frac{s}{\varepsilon} \right) \right) * L^{-1} \left(\frac{1}{T s} \right) \quad (44) \end{aligned}$$

2.5 算法收敛性证明

定理 1. 考虑系统模型 (10)、扰动估计值 (44)、控制律 (38) ~ (40), 则滑模变量 s 与跟踪误差 z 及 \dot{z} 是有限时间收敛的.

证明. 该定理的证明分为 2 个步骤, 步骤 1 证明滑模面具有有限时间收敛特性, 步骤 2 分析位置跟踪误差 z 与速度跟踪误差 \dot{z} 的收敛特性与收敛区域.

步骤 1. 为证明滑模面的收敛特性, 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{s^T s}{2} + \frac{\tilde{\xi}^T \tilde{\xi}}{2\lambda_2} \quad (45)$$

其中, $\tilde{\xi} = \xi - \hat{k}_4$ 为自适应项估计误差. 对式 (45) 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s^T \dot{s} + \frac{\tilde{\xi}^T \dot{\tilde{\xi}}}{\lambda_2} = \\ & s^T (\ddot{z} + \text{diag}\{\dot{\rho}_1(z)\}(\mathbf{K}_1 z + \mathbf{K}_2 \rho_2(z)) + \\ & \text{diag}\{\rho_1(z)\}(\mathbf{K}_1 \dot{z} + \mathbf{K}_2 \dot{\rho}_2(z))) - \frac{\tilde{\xi}^T \dot{\hat{k}}_4}{\lambda_2} \quad (46) \end{aligned}$$

根据引理 1, 并将式 (41) 代入式 (46), 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -s^T \chi \Lambda (\mathbf{K}_3 s + \mathbf{K}_4 \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) + M^{-1} \tilde{d}) - \\ & \frac{\tilde{\xi}^T \dot{\hat{k}}_4}{\lambda_2} \leq -s^T \chi \Lambda \mathbf{K}_3 s - \\ & \sum_{i=1}^n (\hat{k}_{4i} + \gamma_0) \sigma_i \mu_i (|s_i| - 0.2785\varepsilon) + \\ & |s^T| \chi \Lambda |\xi| - \frac{\tilde{\xi}^T \dot{\hat{k}}_4}{\lambda_2} \leq -s^T \chi \Lambda \mathbf{K}_3 s - \\ & \gamma_0 \|\chi \Lambda |s|\|_1 + 0.2785\varepsilon \|\mathbf{K}_4 \chi \Lambda\|_1 + \\ & |s^T| \chi \Lambda |\tilde{\xi}| - \frac{\tilde{\xi}^T \dot{\hat{k}}_4}{\lambda_2} \quad (47) \end{aligned}$$

将自适应更新率 (42) 代入式 (47) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -s^T \chi \Lambda \mathbf{K}_3 s - \gamma_0 \|\chi \Lambda |s|\|_1 + \\ & 0.2785\varepsilon \|\mathbf{K}_4 \chi \Lambda\|_1 + |s^T| \chi \Lambda |\tilde{\xi}| - \\ & \frac{\tilde{\xi}^T (-\lambda_1 \hat{k}_4 + \lambda_2 \chi \Lambda |s|)}{\lambda_2} = \\ & -s^T \chi \Lambda \mathbf{K}_3 s - \gamma_0 \|\chi \Lambda |s|\|_1 + \\ & 0.2785\varepsilon \|\mathbf{K}_4 \chi \Lambda\|_1 + \frac{\tilde{\xi}^T \hat{k}_4 \lambda_1}{\lambda_2} \quad (48) \end{aligned}$$

由杨氏不等式有 $\tilde{\xi}^T \hat{k}_4 = \tilde{\xi}^T (\xi - \tilde{\xi}) \leq \xi^T \xi / 2 - \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} / 2$, 将其代入式 (48) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -s^T \chi \Lambda \mathbf{K}_3 s - \gamma_0 \|\chi \Lambda |s|\|_1 + \\ & 0.2785\varepsilon \|\mathbf{K}_4 \chi \Lambda\|_1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{\xi^T \xi - \tilde{\xi}^T \tilde{\xi}}{2} + \right. \\ & \left. \frac{(\xi^T \xi)^{\frac{1}{2}} - (\tilde{\xi}^T \tilde{\xi})^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2}} \right) = -\frac{s^T \mathbf{K}_3^u s}{2} - \frac{\mathbf{K}_2^u |s|}{\sqrt{2}} - \\ & \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{\tilde{\xi}^T \tilde{\xi}}{2} + \left(\frac{\tilde{\xi}^T \tilde{\xi}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) + \sigma_0 \leq -\frac{\lambda_{\min}^{\mathbf{K}_3^u} s^T s}{2} - \\ & \frac{\lambda_{\min}^{\mathbf{K}_2^u} (s^T s)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2}} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{\tilde{\xi}^T \tilde{\xi}}{2} + \left(\frac{\tilde{\xi}^T \tilde{\xi}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) + \sigma_0 \leq \\ & -\sigma_1 V^{\frac{1}{2}} + \sigma_0 \quad (49) \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{K}_2^u = \sqrt{2} \gamma_0 \chi \Lambda$, $\mathbf{K}_3^u = 2 \chi \Lambda \mathbf{K}_3$, $\sigma_0 = \lambda_1 / \lambda_2 (\xi^T \xi / 2 + (\xi^T \xi / 2)^{1/2})$, $\sigma_1 = \min\{\lambda_{\min}^{\mathbf{K}_3^u}, \lambda_1 / \lambda_2\}$, λ_{\min} 为矩阵 “.” 的最小特征值. 由引理 2 可知, 存在 $0 < \theta_1 < 1$, s_i 在有限时间 T_{r1} 内收敛至某一区域, 收敛域的上界为:

$$\begin{cases} \Omega_1 = \left\{ s \mid \|s_i\| \leq \frac{\sigma_{0i}}{(1-\theta_1)\sigma_1} = \delta_{2i} \right\} \\ T_{r1} = \frac{2V_1^{\frac{1}{2}}(0)}{\theta_1 \sigma_1} \end{cases} \quad (50)$$

其中, $\sigma_{0i} = \lambda_1 \xi_i^T \xi_i / (2\lambda_2) + \lambda_1 / \lambda_2 (\xi_i^T \xi_i / 2)^{1/2}$.

步骤 2. 根据式 (50), 当满足 $|s_i| \geq \delta_{2i}$ 时, 滑模面 s_i 具有有限时间收敛特性. 根据引理 3, z_i 的有限时间收敛区域为 $\Omega_{1i} = \{z_i \mid |z_i| \leq \max\{\delta_{0i} / (k_{1i} + \beta_{3i} k_{2i}), \Delta_{1i}\}\}$. \square

3 算法仿真与验证

为验证控制算法有效性, 本文以图 2 所示的具有 7 个支链的冗余驱动绳索并联机器人为控制对象进行算法仿真, 机器人运动学参数与惯性参数如表 1 与表 2, 各部件的惯性张量在其质心处的固连坐标系下测量.

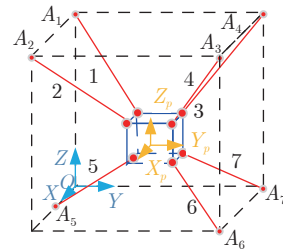


图 2 带有 7 个驱动绳索的 RCDPR
Fig.2 The RCDPR with 7 driving cables

表 1 RCDPR 运动学参数 (mm)

Table 1 Kinematic parameters of the RCDPR (mm)			
参数	数值	参数	数值
b_1	[0, 0, 1000]	a_1	[-150, -100, 50]
b_2	[100, 0, 1000]	a_2	[150, -100, 50]
b_3	[1000, 1000, 1000]	a_3	[150, 100, 50]
b_4	[0, 1000, 1000]	a_4	[-150, 100, 50]
b_5	[500, 0, 0]	a_5	[0, -100, -50]
b_6	[1000, 1000, 0]	a_6	[150, 100, -50]
b_7	[0, 1000, 0]	a_7	[-150, 100, 50]
r	20		

为检验本文提出的预设性能有限时间控制算法的有效性, 将分别进行以下仿真: 1) 本文算法 (Pre-

表 2 RCDPR 惯性参数
Table 2 Inertial parameters of the RCDPR

参数	描述	数值
m_p	动平台质量	1.67 kg
I_p	动平台转动惯量矩阵	$\text{diag}\{2.78 \times 10^4, 5.56 \times 10^4, 7.26 \times 10^4\}$ kg·mm ²
I_b	滑轮转动惯量	1.2×10^4 kg·mm ²

scribed performance sliding mode control, PPSMC); 2) 基于时延估计的连续非奇异快速终端滑模控制 (Time delay estimator based nonsingular fast terminal sliding mode control, TDENFTSMC)^[14]; 3) 基于自适应超螺旋^[37]与 UDE 的非奇异快速终端滑模控制 (Adaptive super-twisting combined UDE based sliding mode control, ASTUDES MC); 4) 基于 UDE 的滑模控制 (UDE based sliding mode control, UDES MC)^[38]. 在仿真中设置扰动 $\mathbf{d} = 0.2\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{f} + 10^4(\sin 5t + \sin 10t) \times \mathbf{1}_{6 \times 1}$; 初始位姿为: $x_0 = 459.95$ mm, $y_0 = 699.95$ mm, $z_0 = 500.05$ mm, $\theta_0 = -0.001$ rad, $\phi_0 = -0.001$ rad, $\varphi_0 = 0.001$ rad; 选取函数 quadprog 对式 (13) 所示优化问题求解, 并设置最小拉力 $\mathbf{F}_b = 20$ N; 各控制器参数如表 3. 机器人期望运行轨迹为:

$$\begin{cases} \gamma = 2\pi \left(\frac{6t^5}{t_d^5} - \frac{15t^4}{t_d^4} + \frac{10t^3}{t_d^3} \right) \\ x = 10 \cos \gamma + 450; y = 10 \sin \gamma + 700 \\ z = 500; \phi = \theta = \varphi = 0 \end{cases} \quad (51)$$

其中, $0 \leq t \leq 1$, $t_d = 1$ s 为时间常数.

图 3 所示为位置跟踪误差及其放大图. 由于本文将给定时间 T_e 设为 0.2 s, 因此, 0 s 至 0.2 s 为瞬态阶段, 0.2 s 至 0.5 s 为稳态阶段. 对于三个平动方向, 文中预设性能函数的初始值分别为 -0.1 mm 与 0.2 mm, 稳态值为 0.001 mm 与 0.002 mm. 可以看出, 采用 TDENFTSMC 与 UDES MC 时, 平动方向位置跟踪误差在整个运行阶段均处于较大波动状态, 波动幅度均达到或接近 1 mm, 远超出预设性能函数边界. 因此, 虽然 UDE 与 TDE 选取了较小的时间常数, 但对于快时变大扰动, 仅采用扰

动观测器仍然难于取得良好的跟踪性能. 当采用 ASTUDES MC 时, 平动方向位置跟踪误差出现了显著减低, 瞬态阶段幅值在 0.25 mm 左右, 稳态阶段幅值约为 0.004 mm. 虽然也超出了预设性能函数边界, 但与 TDENFTSMC 与 UDES MC 相比瞬态与稳态误差分别降低了 50% 与 99% 左右, 这是由于 ASTUDES MC 采用自适应超螺旋算法 (Adaptive super-twisting algorithm, AST) 对扰动观测误差进行补偿. 同时, 当采用本文算法时, 在整个运行阶段平动方向位置跟踪误差均在预设性能函数边界内. 对于转动方向, 预设性能函数的初始值分别为 -0.001 rad 与 0.002 rad, 稳态值为 0.0001 rad 与 0.0002 rad. 采用 UDES MC 时, 三个转动方向的稳态与瞬态误差均超出性能函数边界; TDENFTSMC 算法在 x 与 z 转动方向的瞬态阶段超出了性能函数边界; ASTUDES MC 在 z 转动方向的瞬态阶段超出边界, 其他时刻均在边界内; 采用本文算法时, 角位置跟踪误差均在性能函数边界线以内. 可以看出, 采用本文提出的非对称给定时间预设性能控制时, 位置跟踪误差在瞬态与稳态阶段均可在给定时间实现预设的位置跟踪精度.

图 4 所示为速度跟踪误差. 在平动方向上, 采用 TDENFTSMC 与 UDES MC 算法时, 平动方向的速度跟踪误差在整个运行阶段均处于大幅度波动状态, 三个平动方向的最大瞬态幅值均在 7.4 mm/s 与 7 mm/s 以上, 对应的最大稳态幅值在 5.5 mm/s 与 3.6 mm/s 以上; 当采用 ASTUDES MC 算法时, 三个平动方向的最大瞬态速度跟踪误差分别达到了 18.7 mm/s、13.6 mm/s 与 12 mm/s, 稳态阶段的最大速度误差均小于 0.42 mm/s, 且在 0.6 s 以后对应值小于 0.08 mm/s, 这是由于该算法在扰动观测器基础上采用了增益较大的 AST 算法, 在初始阶段位置跟踪误差较大使得速度波动剧烈, 同时由于采用 AST 对扰动观测误差进行自适应补偿, 稳态误差与仅使用观测器进行扰动估计的 TDENFTSMC 与 UDES MC 相比显著降低; 当采用本文算法时, 三个平动方向的最大瞬态速度跟踪误差与

表 3 各控制器参数
Table 3 Parameters of all controllers

控制器	参数	值
PPSMC	$\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, a_1, a_2, a_3, \Delta_{11}, \Delta_{12}, \Delta_{13}, \Delta_{14}, \Delta_{15}, \Delta_{16}, \beta_4, \beta_5, \mathbf{K}_3, \gamma_0, T, \lambda_1, \lambda_2, T_e, \varepsilon_{1b}, \varepsilon_{2b}, \mu_0, \mu_\infty, k$	$100\mathbf{I}_6, 50\mathbf{I}_6, 0.5, 1.5, 1.8, 0.01, 0.01, 0.01, 0.001, 0.001, 0.001, 5, 5, 10\mathbf{I}_6, 10, 0.001$ s, 0.001, 0.01, 0.2 s, 0.5, 1, [0.2, 0.2, 0.2, 0.02, 0.02, 0.02] ^T , 0.002[1, 1, 1, 0.01, 0.01, 0.01] ^T , 30
ASTUDES MC	$k_1, k_2, a_b, T, \varepsilon, \omega_1 \sqrt{\gamma_1/2}, \lambda + 4 \varepsilon^2$	$100\mathbf{I}_6, 50\mathbf{I}_6, 0.5, 0.001$ s, 0.5, 500, 10
TDENFTSMC	$\rho_1, \rho_2, a_{1b}, a_{2b}, k_1, k_2, L$	$100\mathbf{I}_6, 50\mathbf{I}_6, 0.5, 1.8, 0.001$ s
UDES MC	$c, 1/a, k$	160, 0.001 s, 20

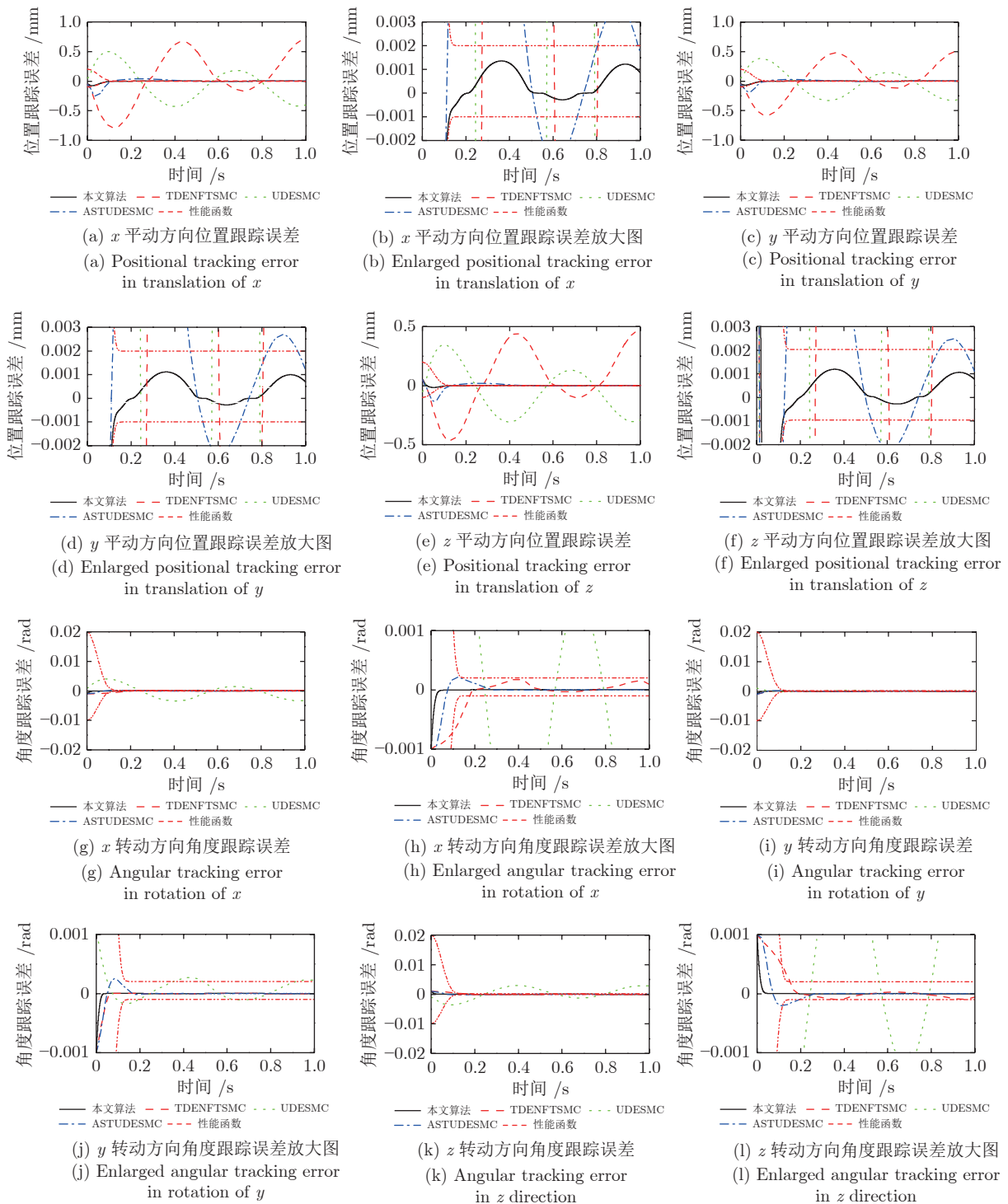


图 3 位置与角度跟踪误差

Fig.3 Positional and angular tracking errors

稳态跟踪误差均小于 4 mm/s 与 0.02 mm/s, 远小于其他三种算法. 同时, 在转动方向上, 采用本文控制算法时三个方向的瞬态误差最大, 但稳态跟踪误差最小, 对应值均小于 0.00002 rad/s. 这是由于本文在进行仿真时未在转动方向施加运动, 使得采用

4 种控制器时转动方向上的速度跟踪误差均较小, 同时由于本文采用针对输出约束的预设性能控制, 在保证位置跟踪精度的同时, 由于动力学模型的强耦合性, 在未施加运动的转动方向瞬态速度跟踪误差较大, 而瞬态误差可保证在较小范围.

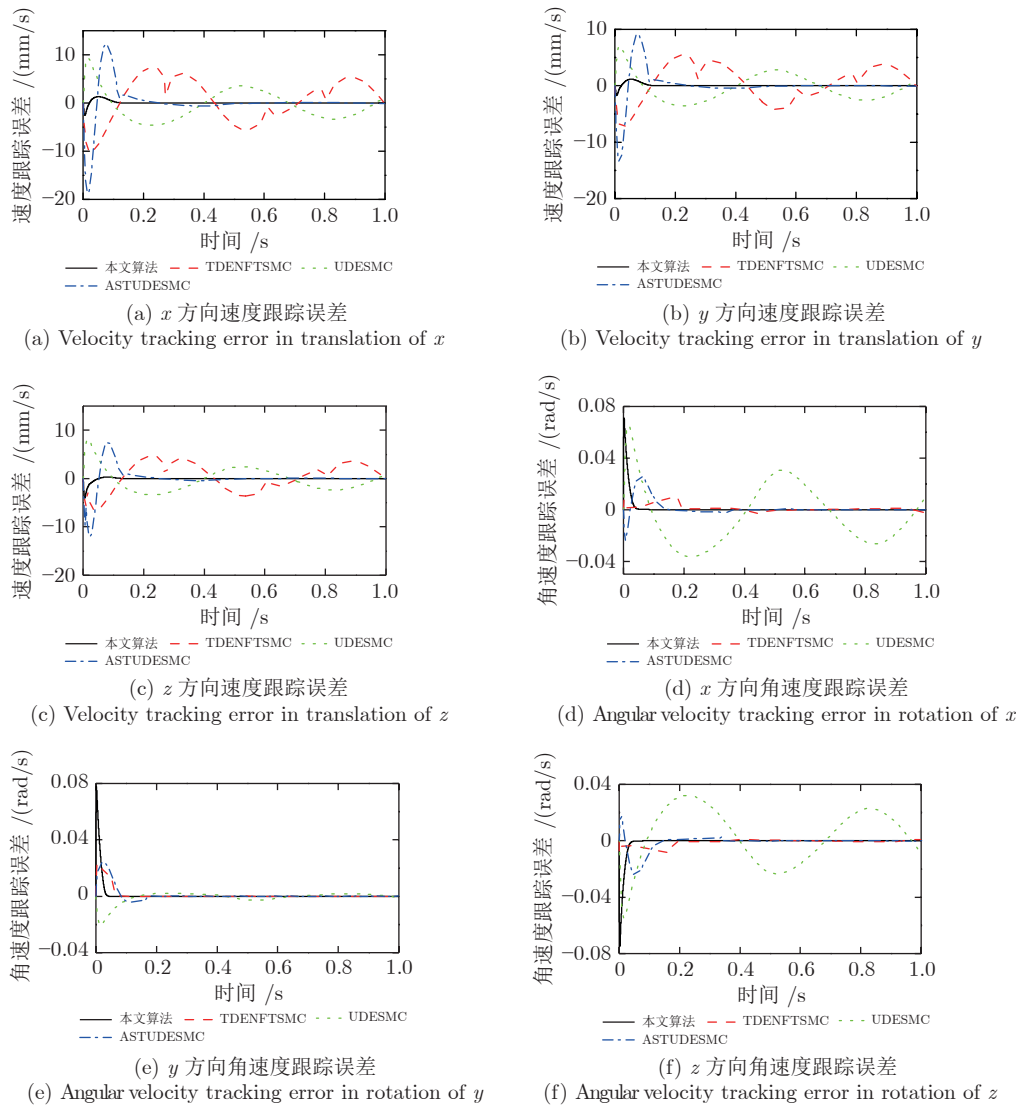


图 4 速度跟踪误差

Fig. 4 Velocity tracking error

图 5 所示为采用本文算法时的驱动力矩及其与其他控制算法的驱动力矩差值对比. 可以看出, 采用本文算法时驱动力矩总体较平滑, 驱动绳索 3 与 4 的最大驱动力矩值约为 $200 \text{ N}\cdot\text{m}$, 其他各绳索的最大驱动力矩均小于 $100 \text{ N}\cdot\text{m}$, 在实际使用中可以通过增加绳索数目以减小各绳索的最大驱动力矩或引入减速器以提高电机输出力矩进而满足使用要求. 与其他三种控制算法相比, 在初始时刻, 驱动力矩的差值约为 $\pm 1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 约为此时驱动力矩的 $\pm 10\%$, 这是由于采用不同控制算法时各关节驱动力矩分配不同及时间延迟造成的, 并未出现显著的力矩变化. 与 TDENFTSMC 与 UDESMC 相比, 在瞬态阶段的最大驱动力矩差值约为 $\pm 0.8 \text{ N}\cdot\text{m}$, 约为此时对应驱动力矩 $\pm 1.6\%$; 在稳态阶段, 对应的最大驱动力

矩差值也基本处于该水平. 同时, 采用本文算法时瞬态阶段及 0.8 s 至 1 s 之间各绳索的驱动力矩值均小于 ASTUDESMC 算法的对应值, 绳索 6 的驱动力矩差的幅值约为 $1.6 \text{ N}\cdot\text{m}$, 其他各绳索约为 $0.7 \text{ N}\cdot\text{m}$, 这是由于为实现高精度的跟踪性能, ASTUDESMC 算法中 AST 更新率增益较大产生的, 其他时刻的驱动力矩差的幅值约为 $0.8 \text{ N}\cdot\text{m}$, 与此时驱动力矩相比, 波动幅度较小. 可以看出, 采用本文算法时, 在保证较高的位置跟踪精度时, 驱动力矩并未显著增加, 且与 ASTUDESMC 相比, 驱动力矩反而减小.

图 6 所示为采用本文算法时各绳索拉力, 经过优化, 各绳索拉力连续, 且均大于 20 N , 即绳索处于拉伸状态, 符合预期要求. 图 7 与图 8 分别为采用本文算法与 ASTUDESMC 时自适应项系数估计

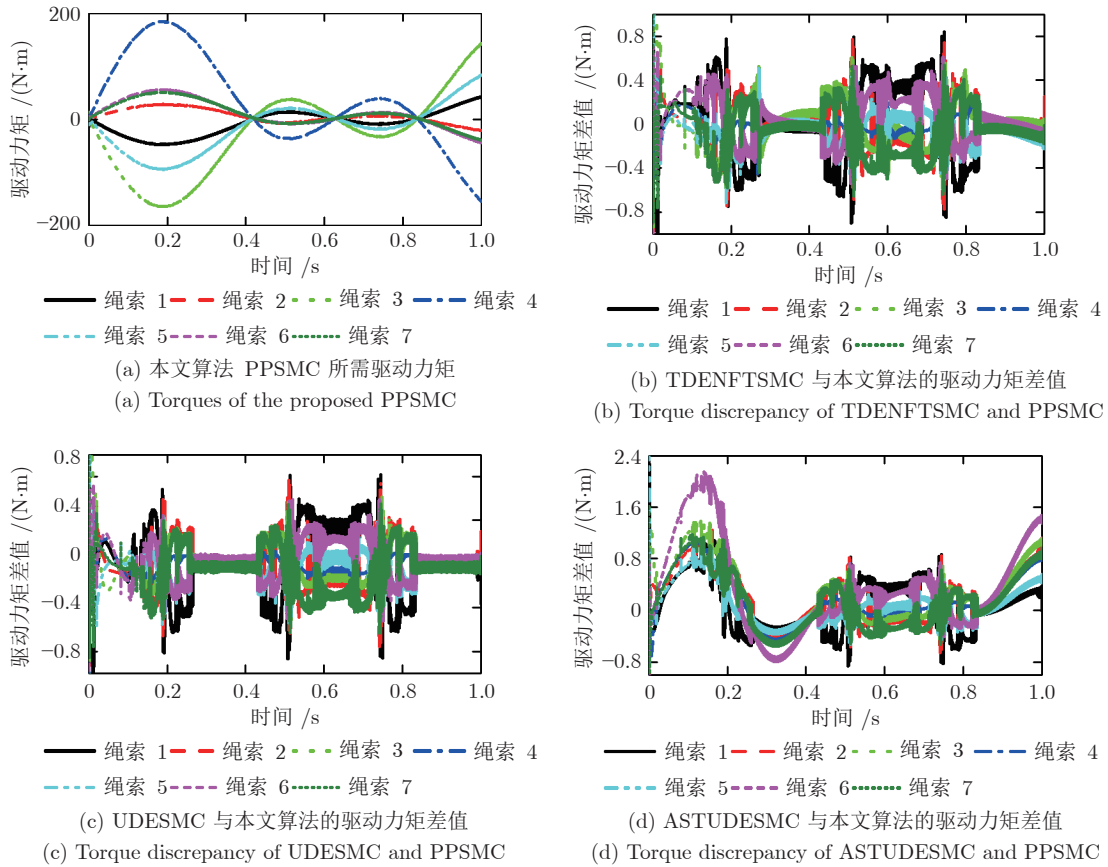


图 5 冗余驱动绳索并联机器人驱动力矩及其差值
Fig.5 Torques and torque deviations of the RCDPR

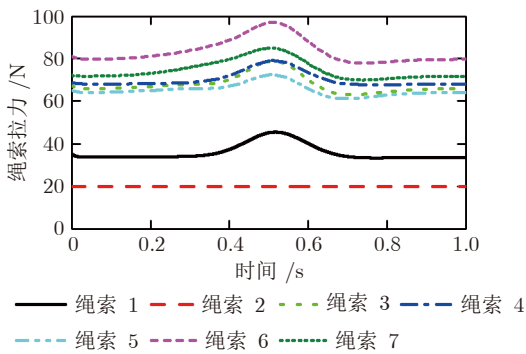


图 6 采用本文算法时 RCDPR 各绳索拉力
Fig.6 RCDPR's pull forces of the proposed controller

值. 采用本文算法时, 由于初始误差较大使得各方向的自适应项系数在初始 0.1 s 内急剧增加, 之后转动方向上增益基本保持稳定, 而平动方向处于缓慢上升趋势; 而当采用 ASTUDESMC 时, 平动方向的增益始终处于增大状态, 在终点时刻达到了 500, 转动方向的增益在 0.1 s 后基本保持不变, 均小于 0.7, 这是由于转动方向未施加运动, 模型不确定部分较小, 而平动方向施加运动使得模型不确定

部分较大, 对于快时变大扰动, 虽然在算法仿真时选取的时间常数较小, 但扰动估计误差依然较大, 使得平动方向增益始终处于增加状态. 图 9 与图 10 为采用本文算法时分别基于跟踪误差 e 与 z 时各方向的滑模面数值. 可以看出, 由于两种误差尺度的不同, 虽然跟踪误差 e 可以保证在预设性能函数边界内, 且基于 e 计算的等效滑模面数值较小, 但基于 z 计算的滑模面数值在整个运行过程中处于大幅度波动状态, 平动与转动方向瞬态幅值达到了 330 mm 与 12 rad, 稳态阶段的波动幅值达到 42 mm 与 0.3 rad, 因此, 这也解释了采用本文算法时图 7 所示的变化特点. 提高式 (42) 中 λ_2 值可以降低滑模面数值的变化幅度, 同时也可以减小跟踪误差, 但这将增大增益进而增大驱动力矩值, 本文引入自适应控制的目的是可以根据使用要求减小误差边界值, 并保证系统稳定性.

因此, 从上述位置跟踪误差与力矩的对比研究以及采用本文算法时的绳索拉力及自适应项系数的仿真结果可以看出, 本文提出的控制算法可以实现冗余驱动绳索并联机器人预设性能高精度轨迹跟踪控制.

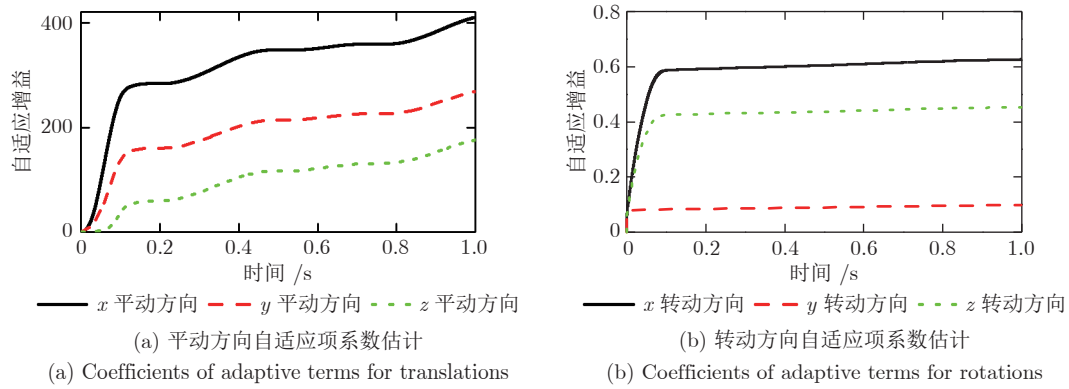


图 7 采用本文算法时自适应项系数
Fig.7 Adaptive coefficients of the proposed controller

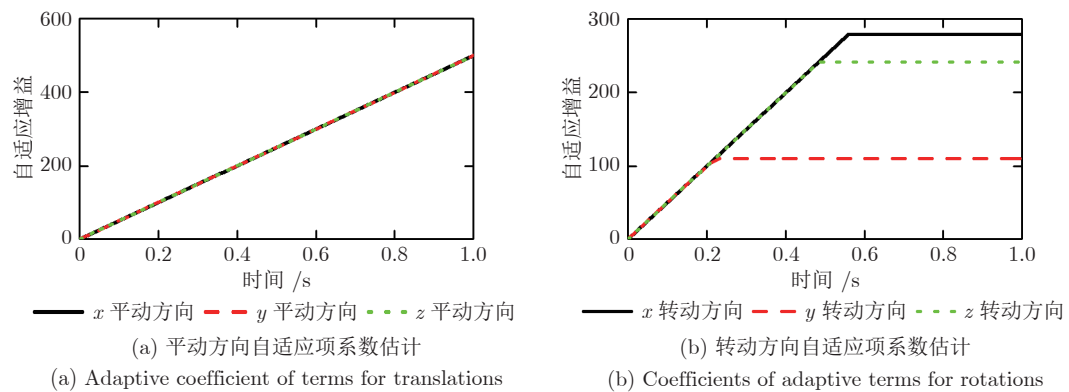


图 8 采用 ASTUDES MC 时自适应项系数
Fig.8 Adaptive coefficients of ASTUDES MC

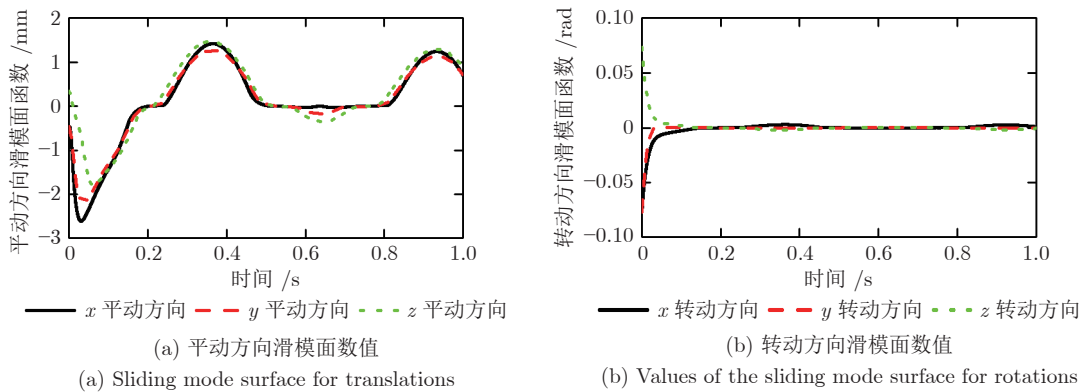
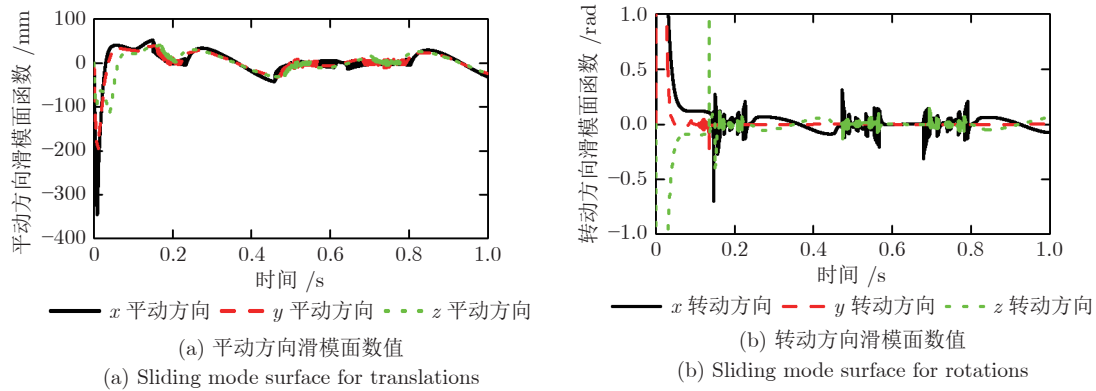


图 9 基于跟踪误差 e 的滑模面数值
Fig.9 Sliding mode surface for tracking error e

4 结论

本文提出了一种考虑输出约束与扰动的冗余驱动绳索并联机器人预设性能有限时间控制算法. 为对机器人的输出进行约束, 设计给定时间衰减函数与非对称变换函数, 并将考虑预设性能的跟踪误差

转换为无约束变量; 在此基础上, 设计精度驱动并在连接点处具有三阶连续性能的非奇异快速终端滑模面进行控制算法设计; 为避免滑模控制的抖振问题, 在预设性能控制中采用 UDE 方法对扰动项进行估计, 同时基于自适应控制对扰动估计误差进行补偿, 并从理论上证明了本文算法具有有限时间收

图 10 基于跟踪误差 z 的滑模面数值Fig.10 Sliding mode surface for tracking error z

敛特性. 最后以 7 自由度冗余驱动绳索并联机器人为对象进行仿真研究. 结果表明, 与 TDENFTSMC、ASTUDES MC 及 UDES MC 相比, 本文算法得到的位姿跟踪误差始终处于约束边界以内, 速度与角速度跟踪误差收敛速度快, 且驱动力矩并未显著增加, 同时绳索拉力始终不小于设定的 20 N, 进而实现了冗余驱动绳索并联机器人的预设性能有限时间控制. 后续将开展具有固定时间收敛特性的扰动观测器及预设性能函数的研究, 进一步减小跟踪误差收敛时间, 同时将搭建实验平台对本文算法进行实验验证.

References

- 1 Begey J, Cuvillon L, Lesellier M, Gouttefarde M, Gangloff J. Dynamic control of parallel robots driven by flexible cables and actuated by position-controlled winches. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, **35**(1): 286–293
- 2 Jiang Lei-Jie, Gao Bing-Tuan, Liu Chuan-De, Zhu Zhen-Yu. Trajectory tracking control of a 2-DOF cable-driven parallel mechanism. *Control and Decision*, 2019, **34**(5): 1103–1108 (姜雷杰, 高丙团, 刘传德, 朱振宇. 2-DOF 绳索驱动并联机构轨迹跟踪控制. *控制与决策*, 2019, **34**(5): 1103–1108)
- 3 Asl H J, Janabi-Sharifi F. Adaptive neural network control of cable-driven parallel robots with input saturation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2017, **65**: 252–260
- 4 Chellal R, Cuvillon L, Laroche E. Model identification and vision-based H-infinity position control of 6-DoF cable-driven parallel robots. *International Journal of Control*, 2017, **90**(4): 684–701
- 5 Huang Pan-Feng, Hu Yong-Xin, Wang Dong-Ke, Meng Zhong-Jie, Liu Zheng-Xiong. Capturing the target for a tethered space robot using robust adaptive controller. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(4): 538–547 (黄攀峰, 胡永新, 王东科, 孟中杰, 刘正雄. 空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应控制器设计. *自动化学报*, 2017, **43**(4): 538–547)
- 6 Wang Y, Liu L, Wang D, Ju F, Chen B. Time-delay control using a novel nonlinear adaptive law for accurate trajectory tracking of cable-driven robots. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, **16**(8): 5234–5243
- 7 Chen Z, Wang X, Cheng Y. Adaptive finite-time disturbance observer-based recursive fractional-order sliding mode control of redundantly actuated cable driving parallel robots under disturbances and input saturation. *Journal of Vibration and Control*, DOI: 10.1177/10775463211051460
- 8 Man Z, Paplinski A P, Wu H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, **39**(12): 2464–2469
- 9 Zheng N J, Zhang Y, Guo Y B, Zhang X H. Hierarchical fast terminal sliding mode control for a self-balancing two-wheeled robot on uneven terrains. In: Proceedings of the 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, China: IEEE, 2017. 4762–4767
- 10 Feng Y, Yu X H, Man Z H. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators. *Automatica*, 2002, **38**(12): 2159–2167
- 11 Zhang Guo-Qing, Huang Chen-Feng, Wu Xiao-Xue, Zhang Xian-Ku. Adaptive finite time dynamic positioning control of fully-actuated ship with servo system uncertainties. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(10): 1907–1912 (张国庆, 黄晨峰, 吴晓雪, 张显库. 考虑伺服系统增益不确定的船舶动力定位自适应有限时间控制. *自动化学报*, 2018, **44**(10): 1907–1912)
- 12 Van M, Ge S S, Ren H L. Finite time fault tolerant control for robot manipulators using time delay estimation and continuous nonsingular fast terminal sliding mode control. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, **47**(7): 1681–1693
- 13 Zhai J Y, Song Z B. Adaptive sliding mode trajectory tracking control for wheeled mobile robots. *International Journal of Control*, 2019, **92**(10): 2255–2262
- 14 Wang Y, Zhu K, Chen B, Jin M. Model-free continuous nonsingular fast terminal sliding mode control for cable-driven manipulators. *ISA Transactions*, 2020, **98**: 483–495
- 15 Li De-Yun, Xu De-Gang, Gui Wei-Hua. Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller. *Control and Decision*, 2021, **36**(6): 1311–1323 (李德昀, 徐德刚, 桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制. *控制与决策*, 2021, **36**(6): 1311–1323)
- 16 Li Zhong-Qi, Jin Bai, Yang Hui, Tan Chang, Fu Ya-Ting. Distributed sliding mode control strategy for high-speed EMU strong coupling model. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(3): 495–508 (李中奇, 金柏, 杨辉, 谭畅, 付雅婷. 高速动车组强耦合模型的分式滑模控制策略. *自动化学报*, 2020, **46**(3): 495–508)
- 17 Patre B M, Londhe P S, Waghmare L M, Mohan S. Disturbance estimator based non-singular fast fuzzy terminal sliding mode control of an autonomous underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 2018, **159**: 372–387
- 18 Li Fan-Biao, Huang Pei-Ming, Yang Chun-Hua, Liao Li-Qing, Gui Wei-Hua. Sliding mode control design of aircraft electric

- brake system based on nonlinear disturbance observer. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(11): 2557–2569
(李繁飘, 黄培铭, 阳春华, 廖力清, 桂卫华. 基于非线性干扰观测器的飞机全电刹车系统滑模控制设计. *自动化学报*, 2021, **47**(11): 2557–2569)
- 19 Wang P, Zhang D, Lu B. ESO based sliding mode control for the welding robot with backstepping. *International Journal of Control*, 2020, **94**(12): 3322–3331
- 20 Wang Y, Yan F, Chen J, Ju F, Chen B. A new adaptive time-delay control scheme for cable-driven manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(6): 3469–3481
- 21 Liu Fan, Yang Hong-Yong, Yang Yi-Ze, Li Yu-Ling, Liu Yuan-Shan. Finite-time integral sliding-mode control for multi-agent systems with mismatched disturbances. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(4): 749–758
(刘凡, 杨洪勇, 杨怡泽, 李玉玲, 刘远山. 带有不匹配干扰的多智能体系统有限时间积分滑模控制. *自动化学报*, 2019, **45**(4): 749–758)
- 22 Kolhe J P, Shaheed M, Chandar T S, Talole S E. Robust control of robot manipulators based on uncertainty and disturbance estimation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2013, **23**(1): 104–122
- 23 Lu Q, Ren B B, Parameswaran S. Uncertainty and disturbance estimator-based global trajectory tracking control for a quadrotor. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, **25**(3): 1519–1530
- 24 Dong Y T, Ren B B. UDE-based variable impedance control of uncertain robot systems. *IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics-Systems*, 2019, **49**(12): 2487–2498
- 25 Nam Y J. Comparison study of time delay control (TDC) and uncertainty and disturbance estimation (UDE) based control. In: Proceedings of the 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Gyeongju, South Korea: IEEE, 2016. 749–756
- 26 Zhou Z, Zhu F, Xu D, Guo S, Liu T, Li X. Robust free-time-stable fault tolerant control for rigid satellite attitude system with output constraint. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, **31**(16): 7587–7760
- 27 Li Xin-Kai, Zhang Hong-Li, Fan Wen-Hui. Finite-time control for morphing aerospace vehicle based on time-varying barrier Lyapunov function. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(6): 1530–1542
(李新凯, 张宏立, 范文慧. 基于时变障碍李雅普诺夫函数的变体无人机有限时间控制. *自动化学报*, 2022, **48**(6): 1530–1542)
- 28 Wu Y Y, Zhang Y, Wu A G. Preassigned finite-time attitude control for spacecraft based on time-varying barrier Lyapunov functions. *Aerospace Science and Technology*, 2021, **108**: Article No. 106331
- 29 Wu X, Zheng W, Zhou X, Shao S. Adaptive dynamic surface and sliding mode tracking control for uncertain QUAV with time-varying load and appointed-time prescribed performance. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, **358**(8): 4178–4208
- 30 Shabana A A. *Dynamics of Multibody Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- 31 Merlet J P. *Parallel Robots*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2005.
- 32 Wu Y, Li G, Zuo Z, Liu X, Xu P. Practical fixed-time position tracking control of permanent magnet DC torque motor systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, **26**(1): 563–573
- 33 Yu J, Shi P, Zhao L. Finite-time command filtered backstepping control for a class of nonlinear systems. *Automatica*, 2018, **92**: 173–180
- 34 Kuperman A, Zhong Q C. Robust control of uncertain nonlinear systems with state delays based on an uncertainty and disturbance estimator. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2011, **21**(1): 79–92
- 35 Tian Z, Zhong Q C, Ren B, Yuan J. Stabilisability analysis and design of UDE-based robust control. *IET Control Theory and Applications*, 2019, **13**(10): 1445–1453
- 36 Zheng Z, Feroskhan M. Path following of a surface vessel with prescribed performance in the presence of input saturation and external disturbances. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, **22**(6): 2564–2575
- 37 Shtessel Y B, Moreno J A, Plestan F, Fridman L M, Poznyak A S. Super-twisting adaptive sliding mode control: A Lyapunov design. In: Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010. 5109–5113
- 38 Tian Z, Lyu Z, Yuan J, Wang C. UDE-based sliding mode control of DC–DC power converters with uncertainties. *Control Engineering Practice*, 2019, **83**: 116–128



陈正升 中国矿业大学信息与控制工程学院讲师。2016 年获得哈尔滨工业大学博士学位。主要研究方向为机器人动力学建模与控制。

E-mail: chenzhengsheng@cumt.edu.cn

(CHEN Zheng-Sheng Lecturer at the School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology. He received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2016. His main research interest is dynamic modeling and control of robotics.)



程玉虎 中国矿业大学信息与控制工程学院教授。2005 年获得中国科学院自动化研究所博士学位。主要研究方向为机器学习, 智能优化与控制。

E-mail: chengyuhu@163.com

(CHENG Yu-Hu Professor at the School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology. He received his Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2005. His research interest covers machining learning, intelligent optimization and control.)



王雪松 中国矿业大学信息与控制工程学院教授。2002 年获得中国矿业大学博士学位。主要研究方向为机器学习, 模式识别。本文通信作者。

E-mail: wangxuesongcumt@163.com

(WANG Xue-Song Professor at the School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology. She received her Ph.D. degree from China University of Mining and Technology in 2002. Her research interest covers machine learning and pattern recognition. Corresponding author of this paper.)